

Proses Biostimulasi dengan Optimasi Nutrien Untuk Bioremediasi Tanah Tercemar Tumpahan Minyak Mentah Dikawasan Pantai

Munawar⁽¹⁾, Mukhtasor⁽²⁾

⁽¹⁾ Staf Pengajar Jurusan Teknik Lingkungan UPN "Veteran" Jawa Timur

⁽²⁾ Staf Pengajar Fakultas Teknologi Kelautan ITS

ABSTRAK

Bioremediasi merupakan aplikasi dari prinsip-prinsip proses biologi untuk mengolah air tanah, tanah dan lumpur yang terkontaminasi zat-zat kimia berbahaya. Bioremediasi dengan menambahkan nutrien dikenal dengan metode biostimulasi. Pada biostimulasi dibutuhkan penambahan nutrien untuk merangsang pertumbuhan mikroba. Keberhasilan bioremediasi seringkali diukur dari persen reduksi konsentrasi kontaminan dalam tanah atau air tanah. Dari hasil penelitian ini diperoleh nilai optimum nutrien tambahan dengan perbandingan N:P sebesar 107,63 : 1, dengan jumlah nutrien (% P) sebesar 8,471 dan diperoleh koefisien penurunan konsentrasi minyak (k) 0,033 /hari. Sementara itu pada percobaan ini dengan nutrien tambahan sebanyak 8,47 % P dengan rasio N : P = 105,5 : 1, sedangkan prosentase bioremediasi diperoleh sekitar 88,47%. Output analisis regresi nilai $R-Sq(adj) = 82,2\%$ menunjukkan bahwa response yang diharapkan signifikansinya tinggi. Penelitian dilakukan pada tanah dekat pantai Surabaya timur Wilayah Kelurahan Keputih Kecamatan Sukolilo, yang pelaksanaanya pada bulan September - November tahun 2007.

Kata kunci : Bioremediasi, Hidrokarbon Biostimulasi, Nutrien, Optimasi

ABSTRACT

The Bioremediation process is application basic of principles biological process for treatment ground water, soils and sludges contaminated by chemical hazard waste. Bioremediation with added nutrient is biostimulation method. Biostimulation added nutrients to growth of mikroba. The success of bioremediation process measure from percent removal contaminant concentration in soils atau ground waters. Result research optimum value of added nutrient with ratio N:P is 107,63 : 1, with (% P) is 8,471 and removal concentration of oil coefficient (k) 0,033 /day. The research use added nutrient 8,47 % P with ratio N : P = 105,5 : 1, percent bioremediation is 88,47%. Output regression analysis $R-Sq(adj) = 82,2\%$. This result can response high significant. The research do at land/soils near East Surabaya beach in Kelurahan Keputih Kecamatan Sukolilo from September-November, 2007.

Key words : Bioremediation, Biostimulation of Hidrokarbon, Nutrien, Optimization

PENDAHULUAN

Fungsi nutrisi pada bioproses (bioremediasi) adalah sebagai sumber energi, bahan sintesa sel, dan sebagai akseptor elektron di dalam reaksi yang menghasilkan energi. Nutrien dan substrat (polutan) harus dapat ditransportasikan ke dalam sel mikroorganisme. Masuknya substrat ke dalam sel mengharuskan substrat tersebut tersedia dalam bentuk yang memungkinkan substrat untuk masuk ke dalam sel melalui membran tanpa merusak integritas membran sel. Oleh karena itu molekul yang akan diambil harus cukup kecil untuk melalui membran sel dan harus dalam fase terlarut. Karena itu kelarutan polutan dalam air merupakan faktor paling penting bagi bioavailabilitasnya. Kelarutan yang tinggi menghasilkan senyawa yang memiliki availabilitas yang tinggi pula (Rehm dan Reed, 2000).

Bioremediasi adalah aplikasi dari prinsip-prinsip proses biologi untuk mengolah air tanah, tanah, dan lumpur yang terkontaminasi zat-zat kimia berbahaya (Cookson, 1995). Tujuan akhir bioremediasi adalah memineralisasi kontaminan, yaitu mengubah senyawa kimia berbahaya menjadi kurang berbahaya seperti karbondioksida atau beberapa kontaminan lain, senyawa anorganik, air, dan materi yang dibutuhkan oleh mikroorganisme pendegradasi (Eweis dkk, 1998). Dalam sistem bioremediasi, kondisi yang tidak mendukung dimodifikasi dari reaksi biodegradasi ditingkatkan dengan memperbaiki faktor lingkungan yang membatasi aktivitas biologis (Eweis dkk, 1998).

Adanya proses bioremediasi maka dikenal istilah bioavailabilitas. Menurut Commission on Soil and Water Chemistry bioavailabilitas adalah bagian dari polutan yang dapat diambil oleh

organisme dari lingkungannya dan kemudian ditransportasikan, didistribusikan, dan dimetabolisasi oleh organisme. Definisi tersebut menunjukkan bahwa hanya sebagian dari senyawa yang ada dalam tanah yang dapat dimanfaatkan oleh organisme. Pada lingkungan tanah, bioavailabilitas menjadi lebih kompleks karena transfer larutan ke dalam sel dapat dihalangi dan diperlambat oleh beberapa faktor seperti pengurungan dan proses sorpsi-desorpsi. Hal ini dapat terjadi karena molekul polutan terlarut jauh lebih kecil daripada bakteri sehingga polutan tersebut dapat masuk ke dalam mikropori tanah dimana bakteri tidak dapat masuk ke dalamnya. Hal ini lebih banyak terjadi pada tanah liat dibandingkan pada tanah pasir, karena tanah liat lebih banyak mengandung mikropori. Dengan didegradasinya polutan oleh bakteri pada ruang pori yang lebih besar, molekul polutan yang berada dalam mikropori dapat keluar kembali karena adanya kesetimbangan konsentrasi. Proses keluarnya molekul polutan dari mikropori dapat berlangsung lama tergantung pada jarak difusinya dan kecepatan gerak molekul yang dibatasi oleh ruang porinya (Rehm dan Reed, 2000).

Keberhasilan bioremediasi seringkali diukur dari persen reduksi konsentrasi kontaminan dalam tanah atau air tanah. Hal ini kurang tepat karena walaupun bioremediasi mencapai persen penyisihan yang tinggi, belum tentu dapat mencapai tingkat penyisihan yang diinginkan. Dimungkinkan kontaminan dapat saja keluar dari tanah atau air, atau tertransformasi secara abiotik melalui proses volatilisasi, migrasi, atau fotooksidasi. Jika hal ini terjadi maka tujuan bioremediasi untuk detoksifikasi dan immobilisasi kontaminan dapat tidak tercapai. Prospek bioremediasi yang berhasil sebaiknya melakukan

pengendalian terhadap transport kontaminan, misalnya dengan membuat penutup untuk mengumpulkan materi volatil atau membuat sumur monitor untuk mendeteksi migrasi kontaminan. Pada saat yang sama, diperlukan bukti bahwa biodegradasi telah terjadi. Bukti tersebut dapat berupa kenaikan aktivitas mikroorganisme, kenaikan pelepasan karbondioksida, kenaikan pengambilan oksigen, atau kehadiran produk-produk metabolit. In-situ yaitu proses bioremediasi yang dilakukan di tempat terjadinya pencemaran. Bioremediasi tanah secara in-situ memerlukan pemberian oksigen dan nutrisi yang dibutuhkan pada tanah tercemar. Dalam beberapa kasus, populasi mikroorganisme indigen kurang sesuai untuk bioremediasi tanah sehingga kultur mikroorganisme yang sesuai perlu ditambahkan (Eweis dkk, 1998). Bioremediasi terus berkembang sebagai treatment yang efektif dan ramah lingkungan terhadap pantai yang terkontaminasi tumpahan minyak (Venosa dan Zhu, 2003). Meskipun bioremediasi dikenal cukup lama, namun masih terdapat faktor-faktor yang mengontrol bioremediasi yang belum dipahami dengan baik. Penambahan nutrisi adalah praktik bioremediasi yang telah diterima, namun masih sedikit pemahaman mengenai pengaruh sistematis penambahan nutrisi terhadap populasi mikroba pengurai atau berlangsungnya bioremediasi. Pemakaian nutrisi mineral telah digunakan untuk meningkatkan biodegradasi minyak mentah pada berbagai peristiwa tumpahan minyak. Akan tetapi masih banyak masalah yang belum terpecahkan berkaitan dengan bioremediasi minyak mentah. Ada dua teknik pemanfaatan bakteri untuk mendegradasi kontaminan yang terdapat di tanah, lumpur, sedimen, serta air buangan. Teknik pertama adalah

dengan menggunakan bakteri yang telah tersedia dalam tanah.

Bakteri ini distimulasi untuk tumbuh dengan mengoptimalkan faktor-faktor yang mempengaruhi pertumbuhan bakteri sehingga dapat mempercepat proses degradasi, proses ini disebut biostimulasi. Teknik lain dilakukan dengan menambahkan kultur bakteri pada lokasi yang tercemar, selanjutnya meningkatkan kemampuan biodegradasi dengan mikroorganisme tersebut.

Hidrokarbon merupakan senyawa minyak bumi yang berasal dari fosil yang mengalami proses sangat lama bahkan ribuan tahun, sehingga banyak sekali senyawa kimia didalamnya. Salah satu jenis senyawa hidrokarbon adalah hidrokarbon aromatik mengandung satu atau lebih struktur cincin benzen, ini ditandai dengan bau (aroma) yang sangat khas. Senyawa aromatik ada yang dengan mudah didegradasi, ada pula yang resisten, dan juga dalam transformasinya dapat menghasilkan produk intermediat yang tidak diinginkan. Proses penguraian senyawa aromatik dan aromatik polisiklik pada dasarnya mengikuti jalur yang sama, tetapi monoaromatik atau diaromatik akan lebih mudah terdegradasi daripada hidrokarbon aromatik polisiklik karena jumlah cincin aromatik yang lebih sedikit. Monoaromatik paling sederhana adalah benzen. Benzen memiliki sifat nonpolar, tidak larut dalam air tetapi larut dalam pelarut organik seperti dietil eter, karbon tetraklorida, atau heksan. Benzen, toluen, etil benzen, dan xilen dikenal sebagai kelompok BTEX. Senyawa organik volatil ini paling berpotensi berbahaya, terutama benzen, karena bersifat toksik dan karsinogenik. Sehingga BTEX seringkali digunakan sebagai indikator kontaminasi tanah dan air tanah. (Eweis dkk, 1998).

Pesisir merupakan lahan yang membentang dari garis pantai ke arah

pedalaman yang relatif luas, membentang sejauh ratusan kilometer di sepanjang garis pantai dan seringkali beberapa kilometer ke arah pedalaman dari pantai. Garis pesisir adalah garis yang membentuk batas antara pesisir dan pantai. Garis pesisir membatasi pesisir dan pantai yang kedudukannya relatif tetap, garis pesisir akan berimpit dengan garis pantai saat terjadi pasang tertinggi atau gelombang yang relatif besar. Secara biologi, karakteristik pesisir dapat diketahui dari persebaran ke arah darat biota pantai, baik persebaran vegetasi maupun persebaran hewan pantai. Secara klimatologi, karakteristik pesisir ditentukan berdasarkan pengaruh angin laut. Secara hidrologi, karakteristik pesisir ditentukan seberapa jauh pengaruh pasang air laut yang masuk ke darat. Batas ke arah laut bagi daerah kepepesisiran adalah pada lokasi awal pertama kali gelombang pecah terjadi ketika surut terendah (Zuidam, 1986). Penulisan makalah ini bertujuan menyajikan hasil penelitian dengan optimasi nutrisi tambahan pada proses bioremediasi minyak dengan teknik biostimulasi di lingkungan pesisir, dan memberikan informasi tambahan terkait pelaksanaan bioremediasi.

METODE PENELITIAN

1. Lokasi

Lokasi penelitian ini di daerah pesisir timur Surabaya tepatnya wilayah Kelurahan Keputih Kecamatan Sukolilo. Lokasi ini terletak pada garis Lintang $07^{\circ} 12' 20''$ LS ; Garis Bujur $112^{\circ} 44' 08''$ BT ; Tinggi diatas permukaan laut 3 Meter temperatur rata-rata 30.3°C maksimum 33.1°C minimum 26.1°C (BMG Perak Surabaya, 2007)

2. Bahan

Penelitian ini menggunakan nutrisi organik berasal dari hasil proses

komposting yang banyak ditemukan dipasaran, hasil analisa laboratorium nutrisi mengandung $\text{N} = 1,46\%$; $\text{P} = 1,03\%$. Minyak yang digunakan berupa minyak mentah (crude oil) diambil dari sumur minyak milik Pertamina Cepu Jawa Tengah, peristiwa-peristiwa tumpahan minyak yang sering terjadi berupa minyak mentah. Hal ini yang mendasari penelitian ini menggunakan minyak mentah.

3. Cara Kerja

Pada penelitian ini dibuat petak percobaan berukuran $1 \times 1 \text{ m}^2$, dimana antara satu petak dengan petak lain terpisah pada jarak 0,5 meter. Metode penelitian ini merujuk pada penelitian yang dilakukan Delille dkk. (2004). Gambar petak percobaan seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Petak Percobaan di Lokasi

Optimasi dilakukan untuk melihat perbandingan rasio $\text{N} : \text{P}$, dan jumlah nutrisi tambahan yang optimum pada proses bioremediasi minyak. Data percobaan untuk menentukan nilai prediktor X_1 dan X_2 didapatkan dari hasil percobaan dengan menggunakan rancangan percobaan central composite design (CCD). Prediktor yang digunakan sejumlah dua variabel dengan X_1 adalah rasio nutrisi tambahan tiap petak dan X_2 adalah jumlah nutrisi tambahan ($\%\text{P}$). Karena jumlah variabel independen atau prediktornya sebanyak 2 maka nilai k (jumlah faktor) $= 2$. Rancangan ini terdiri dari rancangan $2k = 4$. Titik aksial yang didapatkan adalah $2k = 1,414$. Pengambilan sampel

sebanyak 13, terdiri dari pengamatan aksial sebanyak 4 buah yang didapatkan dari hasil sebanyak $2k = 22 = 4$ dan pengamatan pada titik pusat sebanyak 5 buah (Montgomery DC, 2001). Hasil rancangan petak percobaan didapatkan seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Tabel Rancangan Petak Percobaan yang Dilaksanakan.

Petak	kodeX1	kodeX2	X1	X2
1	-1	1	31	1370
2	1	1	180	1370
3	-1,414	0	1	822
4	0	0	105,5	822
5	0	1,414	105,5	1597
6	0	-1,414	105,5	47
7	-1	-1	31	274
8	1	-1	180	274
9	0	0	105,5	822
10	0	0	105,5	822
11	0	0	105,5	274
12	1,414	0	211	822
13	0	0	105,5	822

Data respon yang didapatkan juga adalah data prosentase kenaikan jumlah mikroba dan persentase penurunan jumlah kandungan minyak yang diwakili senyawa BTX, selanjutnya dilakukan analisis statistik dengan metode response surface. Variabel – variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah, pertama variabel prediktor yaitu X1 = nutrisi dengan rasio N : P (31 : 1 sampai 180 : 1), X2 = jumlah nutrisi yang ditambahkan (274g sampai 1370g) kedua variabel respon adalah Y1 = prosentase jumlah total mikroba, Y2 = prosentase penurunan jumlah konsentrasi minyak. Untuk mengukur jumlah total mikroba (TPC) menggunakan metode pour-plate, jumlah mikroba diukur sebagai perubahan jumlah sel atau massa sel. Cara ini menggunakan media agar yang mengandung nutrisi yang dibutuhkan untuk pertumbuhan mikroba. Sedikit kultur tercampur digesekan pada permukaan agar yang sudah diencerkan kemudian dimasukkan ke dalam cawan

petri. Cawan petri kemudian diinkubasikan dan setiap koloni yang terbentuk pada permukaan diasumsikan sebagai satu sel hidup dalam kultur sebenarnya, sel diukur sebagai colony forming units (cfu). Untuk mengukur konsentrasi minyak dengan melihat senyawa BTX menggunakan alat Gas Chromatography/Mass Spectrometer (GC/MS). Pengambilan sampel penelitian dilakukan secara periodik setiap 7 hari selama 60 hari, seperti terlihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Jadwal Pengambilan Sampel

Hari	Pengambilan sampel
0	ke 1
3	ke 2
10	ke 3
17	ke 4
24	ke 5
31	ke 6
38	ke 7
45	ke 8
52	ke 9
60	ke 10

HASIL dan PEMBAHASAN

Keberhasilan bioremediasi seringkali diukur dari prosen reduksi konsentrasi kontaminan dalam tanah atau air tanah. (Eweis dkk., 1998). Proses bioremediasi dapat diketahui dengan mengukur penurunan konsentrasi minyak pada tanah yang terkena tumpahan minyak, dengan menggunakan formula pada persamaan (12) halaman 50. Langkah-langkah untuk menentukan laju penurunan konsentrasi minyak dengan mencari selisih konsentrasi minyak awal dan konsentrasi minyak akhir tiap waktu pengamatan.

Nilai dL adalah perubahan konsentrasi minyak, L adalah konsentrasi minyaknya dan dt adalah perubahan waktu. Nilai k didapatkan dari konstanta persamaan regresi antara dL/dt sebagai variabel

predictornya dan L sebagai variabel responsnya. Misal contoh untuk petak pertama, data konsentrasi minyak diambil pada tiap waktu mulai hari ke-1 sampai hari ke-60. Langkah selanjutnya, dilakukan regresi sederhana antara waktu dan konsentrasi minyak dengan menggunakan formula sebagai berikut :

$$-\ln(C/Co) = k t \quad (1)$$

Nilai k merupakan koefisien laju penguraian minyak. Dari persamaan tersebut maka didapatkan harga k dengan satuan g/hari untuk masing-masing petak percobaan, seperti terlihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Koefisien Laju Penurunan Konsentrasi Minyak (k)

No petak percoba-an.	Nutri-en tamba-han (g)	rasio N:P	Nutri-en (%P).	Harga k (g/hari)
1	1370	31	14,11	-0,012
2	1370	180	14,11	-0,011
3	822	10	8,47	-0,012
4	822	105,5	8,47	-0,033
5	1597	105,5	16,45	-0,011
6	47	105,5	0,48	-0,011
7	274	31	2,82	-0,011
8	274	180	2,82	-0,011
9	822	105,5	8,47	-0,033
10	822	105,5	8,47	-0,034
11	274	105,5	2,82	-0,021
12	822	211	8,47	-0,011
13	822	105,5	8,47	-0,021

Harga-harga yang ada pada Tabel 3 merupakan input untuk mengetahui nilai optimum yang diinginkan, maka hal ini dilakukan dengan menggunakan analisis response surface, hasilnya terlihat pada Tabel 4

Tabel 4. Response Surface Regression: k versus ratio N : P

The analysis was done using uncoded units.
Estimated Regression Coefficients for K

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0.012482	0.006631	-1.882	0.102
ratio NP	0.000396	0.000080	4.946	0.002
Nutrien	0.000052	0.000010	5.005	0.002
ratio NP*ratio NP	-0.000002	0.000000	-6.066	0.001
Nutrien*Nutrien	-0.000000	0.000000	-5.953	0.001
ratio NP*Nutrien	-0.000000	0.000000	-0.012	0.991

S = 0.004076 R-Sq = 89.6% R-Sq(adj) = 82.2%

Analysis of Variance for K

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	0.001003	0.001003	0.000201	12.08	0.002
Linear	2	0.000001	0.000585	0.000293	17.62	0.002
Square	2	0.001003	0.001003	0.000501	30.18	0.000
Interaction	1	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	0.991
Residual Error	7	0.000116	0.000116	0.000017		
Lack-of-Fit	4	0.000005	0.000005	0.000001	0.03	0.996
Pure Error	3	0.000111	0.000111	0.000037		
Total	12	0.001120				

Obs	StdOrder	K	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	13	0.012	0.010	0.003	0.001	0.51
2	9	0.011	0.011	0.003	0.000	0.02
3	4	0.012	0.013	0.003	-0.001	-0.52
4	5	0.033	0.030	0.002	0.003	0.81
5	11	0.011	0.012	0.003	-0.001	-0.29
6	8	0.011	0.011	0.003	-0.000	-0.07
7	12	0.011	0.010	0.003	0.001	0.29
8	6	0.011	0.011	0.003	-0.000	-0.19
9	7	0.033	0.030	0.002	0.003	0.84
10	2	0.034	0.030	0.002	0.003	0.93
11	3	0.021	0.021	0.002	0.000	0.09
12	10	0.011	0.011	0.003	0.000	0.17
13	1	0.021	0.030	0.002	-0.009	-2.56 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Dari Tabel 4. dari output analisis regresi terlihat bahwa nilai R-Sq(adj) = 82,2% hal ini menunjukkan bahwa response yang diharapkan signifikansinya cukup tinggi, artinya bahwa rasio N : P dan nutrisi yang ditambahkan (%P) merupakan komposisi nutrisi yang optimal dalam proses bioremediasi minyak, bahwa komposisi nutrisi ini mampu menstimulasi mikroorganisme tanah untuk mencapai pertumbuhan yang signifikan. Pada kondisi ini mikroba bekerja dengan cepat sehingga terjadi penurunan konsentrasi minyak dengan cepat pula, karena minyak yang ada dalam tanah berfungsi sebagai substrat, maka adanya substrat tersebut mikroba akan memperoleh sumber karbon untuk keperluan pertumbuhan.

Selanjutnya menentukan titik optimum, dalam menentukan titik optimum dengan menggunakan analisis Canonical. Hasil analisis didapatkan sebagai berikut seperti pada Tabel 5.

Tabel 5. Analisis Response Surface dari data yang didapat

The SAS System 09:02 Friday, July 30, 2008			
Critical Value			
Factor	Coded	Uncoded	Label
X1	-0.028564	107.629316	N:P
X2	0.008022	8.471126	% P

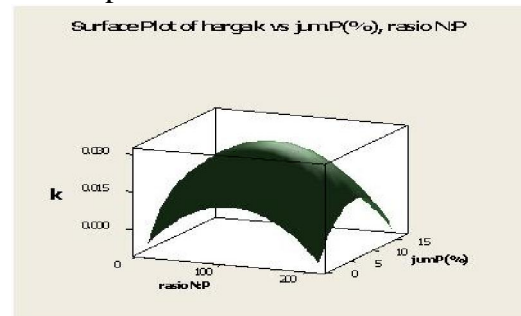
Predicted value at stationary point: 0.033237

Pada Tabel 5, dengan menggunakan software SAS didapat nilai optimal. hal tersebut dapat dijelaskan bahwa nilai optimum pada perbandingan N:P sebesar 107,63 N : 1 P, dengan jumlah nutrien (% P) sebesar 8,4711 dan diperoleh koefisien penurunan konsentrasi minyak (k) sebesar 0,033237. Kondisi ini merupakan capaian penelitian ini, bahwa pada lokasi penelitian dengan kondisi dan karakter tanah serta jenis minyak yang mencemari tanah daratan pantai. Harga koefisien bioremediasi (k) 0,033237 artinya bahwa laju penguraian minyak terjadi lebih cepat, karena apabila dimasuk pada persamaan (1) diperoleh posisi garis yang curam. Untuk memprediksi waktu yang dibutuhkan proses bioremediasi dapat dihitung melalui persamaan (1), dengan memasukan harga k kedalam persamaan tersebut. Begitu juga untuk memprediksi konsentrasi akhir dari proses bioremediasi.

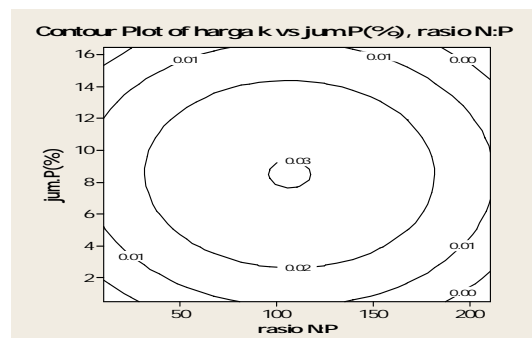
Untuk memperoleh informasi keterkaitan harga k yang optimum terhadap nutrien dan rasio N:P maka dibuat grafik response surface maka diperoleh Gambar 2.

Dari Gambar 2. dapat di informasikan bahwa k optimum terletak nilai 0,033 sampai 0,034. Hal ini mempunyai arti bahwa konstanta terletak di antara 0,033 sampai 0,034 dimana pada konstanta tersebut mempunyai kisaran nilai puncak pada 8 % sampai 9 % untuk jumlah nutrien dan 100 sampai 125 gram untuk rasio N : P. Hal ini juga terlihat pada

countur response nilai k terhadap rasio N : P dan jumlah nutrien (% P), seperti terlihat pada Gambar 3.



Gambar 2. Response nilai k terhadap rasio N:P dan nutrien(%P)



Gambar 3. Countur response nilai k terhadap jumlah P (%) dan rasio N:P

Pada Gambar 3. terlihat bahwa nilai k optimum terletak nilai 0,033 sampai 0,034 , ini dapat diartikan bahwa laju penurunan konsentrasi minyak pada tanah dengan nutrien tambahan sebanyak 8.74 % fospor dengan perbandingan rasio N : P sebanyak 105,5 : 1 terjadi penurunan konsentrasi minyak paling banyak. Hal ini sejalan dengan pernyataan yang dikemukakan oleh Venosa , 2003. Bahwa jumlah nutrien yang ditambahkan pada tumpahan minyak didasarkan pada pertimbangan jumlah N dan P yang diperlukan untuk mengubah jumlah hidrokarbon tertentu menjadi karbon dioksida, air, dan biomassa mikroorganisme. Nutrien yang diaplikasikan harus dalam jumlah tertentu yang tidak melebihi konsentrasi beracun dari ammonia dan atau nitrat. Meskipun demikian jenis dan

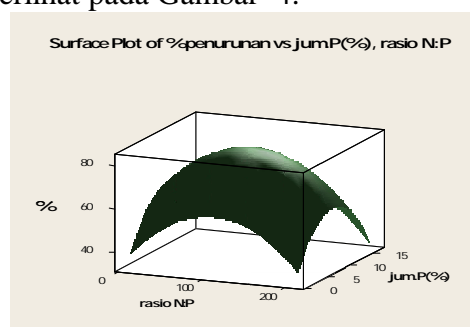
konsentrasi nutrisi optimal sangat bervariasi tergantung properti minyak dan kondisi lingkungan (Venosa dan Zhu, 2003). Dengan hasil penelitian ini telah diperoleh perbandingan jumlah nutrisi yang optimal untuk bioremediasi tumpahan minyak di lingkungan pantai. Untuk mengetahui seberapa jauh optimasi nutrisi pada penelitian ini, yaitu dengan melihat prosentase bioremediasi untuk masing-masing petak percobaan seperti terlihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Prosentase Penurunan Konsentrasi Minyak

No. petak percobaan	Jumlah nutrisi (g)	rasio N:P	Nutrien (%P)	% Bioremediasi
1	1370	31	14,11	60,79
2	1370	180	14,11	57,80
3	822	10	8,47	60,79
4	822	105,5	8,47	87,51
5	1597	105,5	16,45	58,47
6	47	105,5	0,48	57,63
7	274	31	2,82	60,34
8	274	180	2,82	60,34
9	822	105,5	8,47	88,26
10	822	105,5	8,47	88,87
11	274	105,5	2,82	72,96
12	822	211	8,47	59,80
13	822	105,5	8,47	73,35

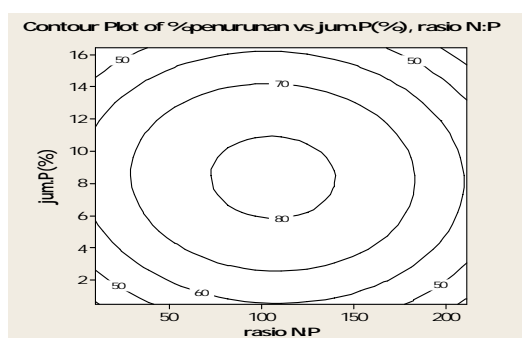
Dari Tabel 6. terlihat bahwa prosentase bioremediasi diperoleh sekitar 88%, dimana terjadi pada petak percobaan no 4, 9 dan 10. Hal ini terjadi disinyalir bahwa dengan nutrisi tambahan sebanyak 8,47 %P dengan rasio N : P = 105,5 : 1 hal ini mengindikasikan bahwa pada komposisi nutrisi tambahan tersebut membuat lingkungan mikroba menjadi optimal, sementara itu nutrisi tambahan yang lain justru membuat lingkungan mikroba menjadi tidak optimal baik tambahan nutrisi yang rendah maupun yang tertinggi. Dimungkinkan untuk tambahan nutrisi yang tinggi menjadi tidak optimal karena kebutuhan nutrisi menjadi berlebih yang

menyebabkan proses biotransformasi sel menjadi terganggu sehingga menghambat pertumbuhan bakteri, akibatnya kinerja mikroba menjadi tidak optimal. Untuk memperoleh informasi keterkaitan prosentase penurunan konsentrasi minyak (% bioremediasi) terhadap nutrisi dan rasio N:P maka dibuat grafik response surface seperti terlihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Prosentase bioremediasi terhadap % P dan rasio N:P

Prosentase bioremediasi juga dapat terlihat pada kontur grafik dimana garis yang bernilai 0,8 berada pada bagian tengah, ini berarti menunjukkan berada pada posisi optimum. Seperti terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Kontur prosentase bioremediasi terhadap % P dan rasio N:P

Hasil analisa laboratorium didapat total jumlah pertumbuhan mikro pada masing-masing petak disajikan dalam Tabel 7

Tabel 7. Hasil Pengujian , Koefisien Laju Pertumbuhan Mikroba (μ)

No. petak perco-baan.	Nutrien tamba-han (g).	Rasio N:P.	Nutrien (% P).	Harga μ /hari
1	1370	31	14,11	0,202
2	1370	180	14,11	0,203
3	822	10	8,47	0,202
4	822	105,5	8,47	0,240
5	1597	105,5	16,45	0,201
6	47	105,5	0,48	0,205
7	274	31	2,82	0,202
8	274	180	2,82	0,202
9	822	105,5	8,47	0,240
10	822	105,5	8,47	0,240
11	274	105,5	2,82	0,199
12	822	211	8,47	0,203
13	822	105,5	8,47	0,236

Dari Tabel 7. Terlihat bahwa koefisien laju pertumbuhan mikroba μ yang tertinggi 0,240/ hari terjadi pada petak percobaan no 4, 9 dan 10. Hal ini terjadi disinyalir bahwa dengan nutrisi tambahan sebanyak 822 g dengan rasio N : P = 105,5 : 1 tersebut membuat lingkungan mikroba menjadi optimal, sementara itu nutrisi tambahan yang lain justru membuat lingkungan mikroba menjadi tidak optimal baik tambahan nutrisi yang rendah maupun yang tertinggi. Dimungkinkan untuk tambahan nutrisi yang tinggi menjadi tidak optimal karena kebutuhan nutrisi menjadi berlebih yang menyebabkan proses biotransformasi sel menjadi terganggu sehingga menghambat pertumbuhan bakteri, akibatnya kinerja mikroba menjadi tidak optimal.

Rasio nutrisi merupakan salah satu sumberdaya lingkungan bagi pertumbuhan mikroorganisme, sehingga para ahli telah menganggap bahwa keberadaan nutrisi adalah faktor yang harus diperhitungkan. Seperti dilaporkan oleh Ian M Head dan Richard PJ Swannell (1999), bahwa Teori rasio-sumberdaya menghubungkan struktur dan fungsi komunitas biologis untuk

kompetisi dalam memperebutkan sumberdaya yang amat diperlukan dalam pertumbuhan. Bila persyaratan kuantitatif bagi untuk limiting resource (yaitu konsentrasi limiting resource [sumberdaya penentu] yang mendukung pertumbuhan nol [zero growth]), pertumbuhan dan laju kematian dari berbagai organisme yang bersaing, teori rasio sumberdaya nutrisi akan memberikan kemungkinan untuk memprediksi akibat (outcome) dari berbagai interaksi. Implementasi dari teori rasio-sumberdaya nutrisi adalah eksperimen kultur chemostat dimana outcome dari kompetisi di antara dua spesies bakteri untuk growth-limiting resource yang bisa ditentukan dari laju pertumbuhan spesifik maksimum dan konstanta dari bakteri yang tumbuh pada substrat. Karena prinsip yang mendasari dari bioremediasi adalah bertambahnya suplai nutrisi penentu (N dan P) untuk menstimulasi mikroorganisme pengurai hidrokarbon asli yang akan berkompetisi untuk mendapatkan nutrisi telah diterima secara luas, maka teori rasio sumberdaya nutrisi bisa digunakan untuk mengembangkan proses bioremediasi.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini diperoleh nilai optimum nutrisi tambahan dengan perbandingan N : P sebesar 107,63 : 1, dengan jumlah nutrisi (% P) sebesar 8,4711 dan diperoleh koefisien penurunan konsentrasi minyak (k) 0,0332/hari. Percobaan ini dengan nutrisi tambahan sebanyak 8,47 %P dengan rasio N : P = 105,5 : 1, sedangkan prosentase bioremediasi diperoleh sekitar 88,47%. Output analisis regresi nilai $R\text{-Sq}(\text{adj}) = 82,2\%$ hal ini menunjukkan bahwa response yang diharapkan signifikansinya tinggi, dapat diartikan bahwa rasio N : P dan nutrisi yang ditambahkan (%P)

merupakan komposisi nutrisi yang optimum dalam proses bioremediasi minyak, artinya komposisi nutrisi ini mampu menstimulasi mikroorganisme tanah untuk mencapai pertumbuhan signifikan. Pada kondisi ini mikroba bekerja dengan cepat sehingga terjadi penurunan konsentrasi minyak dengan cepat pula ini terjadi pada petak percobaan no 4, 9 dan 10. Dimungkinkan untuk tambahan nutrisi yang tinggi menjadi tidak optimal karena kebutuhan nutrisi menjadi berlebih yang menyebabkan proses biotransformasi sel menjadi terganggu sehingga menghambat pertumbuhan bakteri.

DAFTAR PUSTAKA

- BMG, 2007. Badan Meteorologi dan Geofisika Stasiun Meteorologi Maritim, Perak Surabaya.
- Cookson, John T., Jr. (1995). Bioremediation Engineering Design and Application. McGraw-Hill
- Eweis, J.B., Ergas, S.J., Chang, E.D.D.P.Y. Schoroder, Ed. (1998). Bioremediation Principles, New York: McGraw-Hill, Inc
- Fleming ST, Sansoverino J, Sailer GS, 1993 : Quantitative Relationship Between Naphthalene Catabolic Gene-Frequency And Expression In Predicting PAH Degradation In Soil Gas Manufacturing Sites, Environ Sci Technol 27:1068-1074
- Ian M Head dan Richard PJ Swannell (1999), Bioremediation of Petroleum Hydrocarbon Contaminants in Marine Habitats, Marine Pollution Bulletin Vol. 40 pp 135
- Montgomery DC, 2001. Design and Analysis of Experiment 5ed, John Wiley and Sons, New York.
- Rehm, J.H. & Reed, G (2000). Biotechnology, Weinheim: Wiley-VCH,
- Smith VH, Graham DW, Cleland DD (1998): Application of Resource Ratio Theory to Hydrocarbon Degradation, Environ Sci Technol, 32:3386-3395
- Varela P, Levican G, Rivera F, Jerez CA, 1998 : An Immunological Strategy to Monitor in situ the Phosphate Starvation State in *Thiobacillus Ferrooxidans*, Appl Environ Microbiol, 64:4990- 4993
- Venosa AD, Zhu X, 2003. Biodegradation of Crude Oil Contaminating Marine Shorelines and Freshwater wetlands. Spill Science & Technology Bulletin, 8(2): 163–178.
- Zuidam, Van, (1986). Interpretation in Terrain Analysis in Geomorphologic Mapping, Smith Publisher, The Hague Netherland